หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

2.1.1 คำจำกัดความของการบำบัดโดยใช้พืช (Definition of Phytoremediation)

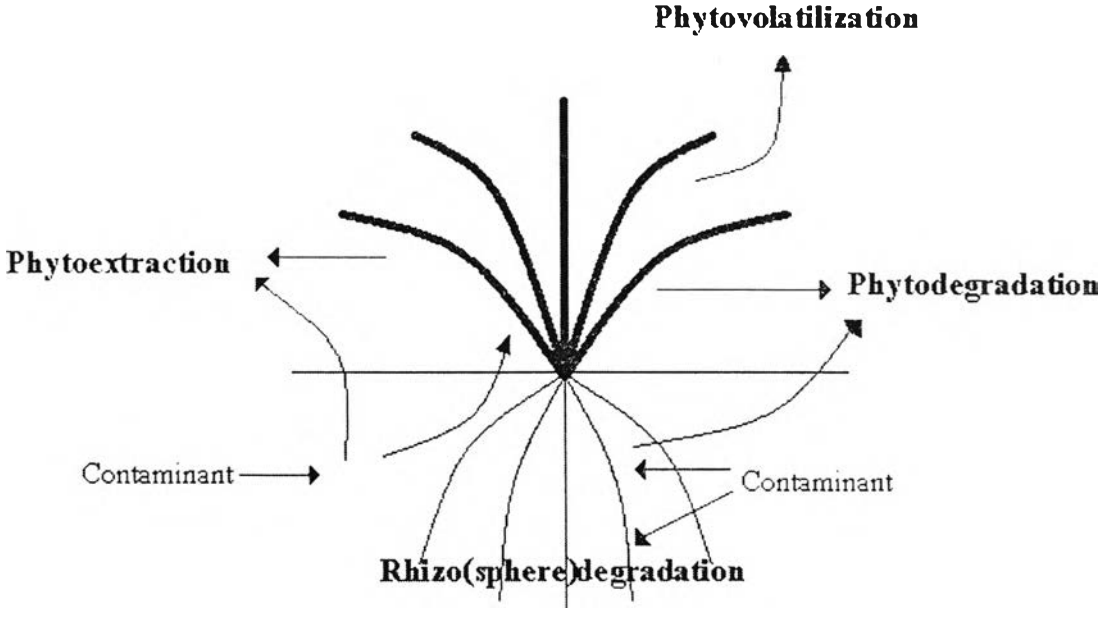
การบำบัดโดยใช้พืช (phytoremediation) มาจากรากศัพท์คำว่า "*Phyto*" ในภาษากรีกที่หมายถึง "พืช" รวมกับคำว่า "*Remedium*" ในภาษาลาตินที่หมายถึง "การแก้ไขหรือการปัดเป่าสิ่งชั่วร้าย" (Cunningham et al., 1996) เมื่อนำทั้งสองคำนี้มารวมกัน หมายถึง การนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน โคลน กากตะกอน หรือน้ำ ที่เกิดการปนเปื้อนโดยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ (International Environmental Technology Centre, 2000) ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำและแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลง ซึ่งกลไกเหล่านี้ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ (เช่น น้ำมัน สารปราบศัตรูพืช เป็นต้น) หรือดูดซับและสะสมจุลธาตุที่เป็นพิษ ได้แก่ โลหะหนักต่างๆ เช่น ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ฯลฯ ไว้ในลำต้น ซึ่งสารประกอบ หรือโลหะหนักเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากพื้นที่เมื่อมีการเก็บเกี่ยวพืชออกไป (Sustainable Strategies, 1997) บางครั้งอาจจะเรียกเทคโนโลยีการทำ phytoremediation นี้ว่า botano-remediation, green remediation, phytotechnology or phytoremediation technologies (McCutcheon and Schnoor, 2003)

2.1.2 ชนิดของการบำบัดโดยใช้พืช (Types of Phytoremediation)

การบำบัดโดยใช้พืชนั้นเป็นเทคนิคที่ใช้พืชในการบำบัดสารพิษต่างๆ ที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยที่จะคัดเลือกพืชที่มีคุณสมบัติเฉพาะมาใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนแต่ละชนิด โดยพืชที่นำมาใช้จะมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนในแต่ละกรณี ดังนั้นจึงสามารถแยกชนิดของการบำบัดโดยใช้พืชได้ตามความสามารถของพืชที่จะนำมาใช้ในการบำบัด ซึ่งสามารถแบ่งแยกหลักๆ ได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ phytodecontamination และ phytostabilization (Cunningham et al., 1996)

2.1.2.1 Phytodecontamination

phytodecontamination จัดว่าเป็นส่วนหนึ่งของ phytoremediation โดยเป็นการลดปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อนให้มีปริมาณลดลงจนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ด้วยความสามารถของพืช จุลินทรีย์ และเทคนิคทางปฐพีวิทยา ซึ่งเทคนิคนี้ยังสามารถแบ่งย่อยตามความสามารถของพืชที่ใช้ในการลดปริมาณของสารปนเปื้อน (Cunningham et al., 1996) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการ Phytodecontamination (ดัดแปลงจาก Cunningham et al., 1996)

1) Phytoextraction คือ การเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนัก โดยพืชสามารถที่จะเคลื่อนย้าย และนำมารวมไว้ในที่เดียวกันจากดินสู่รากพืชและจากรากพืชสู่ส่วนยอดของพืชได้ (Ensley, 2000) ซึ่งพืชชนิดนั้นต้องมีความทนต่อโลหะหนักในความเข้มข้นสูง และสามารถดูดดึงสารพิษต่างๆ ออกจากดินได้ และหลังจากที่พืชดูดดึงสารพิษไปได้ในปริมาณที่เหมาะสมก็สามารถทำการเก็บเกี่ยวพืชนั้นเพื่อนำไปจัดการต่อไป (Cunningham et al., 1996)

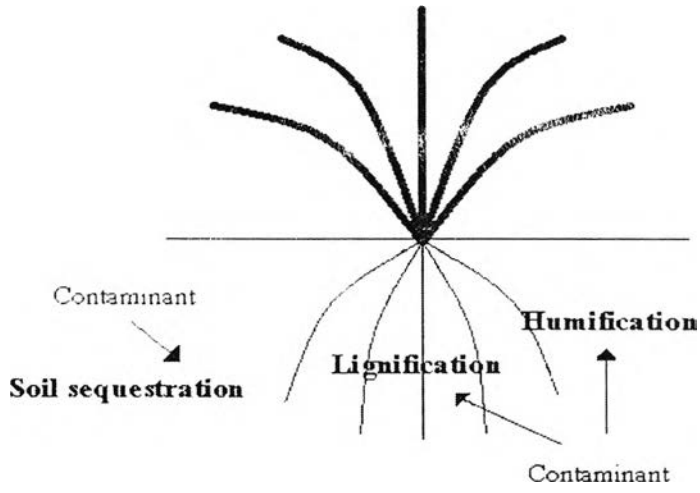
2) Phytovolatilization คือ การเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการเป็นสื่อที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในดินหรือในน้ำออกไปสู่อากาศ (McCutcheon and Schnoor, 2003) โดยที่พืชนั้นสามารถทำงานร่วมกันกับจุลินทรีย์ภายในดินเพื่อเสริมอัตราการระเหยของสารปนเปื้อนได้ ซึ่งการระเหยนี้จะเกิดบริเวณส่วนยอดพืช ส่วนราก และบริเวณพื้นผิวดิน (Cunningham et al., 1996)

3) Phytodegradation คือ การเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการดูดสารปนเปื้อนต่างๆ เข้าไปแล้วทำการเปลี่ยนรูปสารเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม (Cunningham et al., 1996) และ/หรือเปลี่ยนรูปสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมลดลง (Macek, Mackova, and Kas, 2000)

4) Rhizodegradation คือ การที่รากพืชทำงานร่วมกับจุลินทรีย์ในดินสามารถสร้างสารบางชนิดและหลั่งออกมาเพื่อทำการทำลายสารปนเปื้อนรอบๆ บริเวณรากพืช (Cunningham et al., 1996)

2.1.2.2 Phytostabilization

phytostabilization เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ ภายในดินเกิดการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร เกิดการตกตะกอน และมีการควบคุมการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่เป็นพิษต่างๆ ภายในดินให้มีการเคลื่อนย้ายลดลง (Schnoor, 2000) แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีข้อจำกัดที่สำคัญก็ในเรื่องของพื้นที่ กล่าวคือ ต้องเป็นพื้นที่ที่ค่อนข้างมั่นคง ไม่มีการพังทลายของดิน และมีการควบคุมการชะจากน้ำเป็นอย่างดี ซึ่งเทคนิคนี้ยังสามารถแบ่งย่อยตามความสามารถของพืชที่ใช้ในการลดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน (Cunningham et al., 1996) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการ Phytostabilization (ดัดแปลงจาก Cunningham et al., 1996)

1) Humification เป็นกระบวนการที่สารปนเปื้อนทำการรวมตัวกันกับฮิวมัสภายในดินซึ่งจะทำให้สารนั้นมี bioavailability ลดลง

2) Lignification เป็นกระบวนการที่สารประกอบที่เป็นพิษถูกจับไว้กับส่วนประกอบของผนังเซลล์พืชในสภาพที่ไม่สามารถหลุดออกไปได้

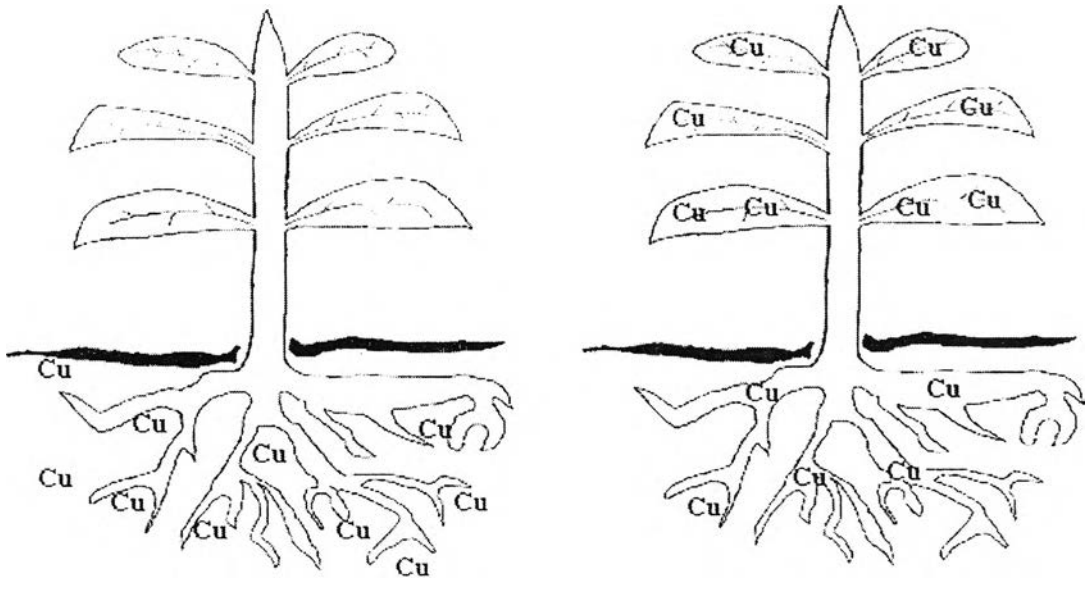
3) Irreversible binding (aging) คือ การที่สารประกอบนั้นอยู่ในสภาพที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวเข้ากับดิน (Cunningham et al., 1996)

2.1.3 หลักการทำงานของการบำบัดโดยใช้พืช

การบำบัดดินที่เกิดการปนเปื้อนสารพิษโดยการใช้พืชนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน จุลินทรีย์ ชนิดของพืช รูปแบบและชนิดของสารปนเปื้อน นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิสัมพันธ์ดังกล่าว คือ สภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ คุณสมบัติของดิน สภาพทางอุทกธรณีวิทยา กลไกของพืช และผลกระทบที่เกิดจากการเกษตรกรรม แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดโดยพืชนั้นจะอาศัยกระบวนการสำคัญๆ ที่นับว่าเป็นหลักการทำงานของการบำบัดโดยพืชดังนี้

2.1.3.1 การดูดดึงสารปนเปื้อนโดยพืช

การดูดดึงสารปนเปื้อนโดยพืชนั้นเป็นการใช้พืชที่มีคุณสมบัติในการดูดสารปนเปื้อนต่างๆ ภายในดิน ซึ่งสารปนเปื้อนเหล่านี้อาจจะถูกนำมาเก็บสะสมเอาไว้ในพืช ใช้เป็นธาตุอาหารของพืช และ/หรือ ถูกเปลี่ยนรูปแล้วปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในสภาวะที่มีความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมลดลง ซึ่งตัวอย่างของเทคนิคที่ใช้หลักของการดูดดึงสารปนเปื้อนโดยพืชก็ได้แก่ phytoextraction, phytovolatilization และ phytodegradation เป็นต้น



รูปที่ 2.3 การดูดดึงโลหะหนัก (ทองแดง) เข้าสู่พืชโดยกระบวนการไฟโตเอ็กซ์เทรกชัน (Uptake of Metals (Copper) by Phytoextraction) (ดัดแปลงจาก International Environmental Technology Centre, 2000)

2.1.3.2 การกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพบริเวณรากพืช

การกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพบริเวณรากพืชนั้น เป็นกระบวนการที่รากพืชทำงานร่วมกันกับจุลินทรีย์บริเวณรากพืชเพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารปนเปื้อนบริเวณรากพืชให้เกิดการย่อยสลายเร็วขึ้น ซึ่งในบางครั้งทั้งพืช และ/หรือ จุลินทรีย์ก็มีการหลั่งสารบางอย่างเพื่อมาย่อยสลายสารปนเปื้อนด้วย ซึ่งตัวอย่างของเทคนิคที่ใช้หลักของการกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพบริเวณรากพืชก็คือ rhizodegradation

2.1.3.3 การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินโดยพืช

การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินโดยพืชเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการปรับสภาพความเป็นพิษของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ภายในดินให้มีความเป็นพิษลดลงโดย phytostabilization กล่าวคือ พืชจะทำการเปลี่ยนรูปของสารปนเปื้อนทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และ/หรือ เกิดการย่อยสลายไปในที่สุด

2.2 Phytoextraction

2.2.1 คำจำกัดความของ Phytoextraction

phytoextraction หมายถึง การเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักโดยสามารถที่จะเคลื่อนย้าย และนำมารวมไว้ในที่เดียวกันจากดินสู่รากพืชและจากรากพืชสู่ส่วนยอดของพืชได้ (Ensley, 2000) โดยพืชชนิดนั้นต้องมีความทนต่อโลหะหนักในความเข้มข้นสูง ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จึงจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดดึงสารพิษต่างๆ ออกจากดิน

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักโดยพืช (อรรณพ หอมจันทร์, 2544)

2.2.2.1 ชนิดของโลหะหนัก

ชนิดของโลหะหนักนั้นมีส่วนสำคัญมากในการที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักเหล่านี้ออกจากดิน เนื่องจากพืชนั้นมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ พืชจะดูดดึงโลหะหนักชนิดที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าโลหะหนักชนิดที่ส่งผลเป็นพิษต่อพืชเพียงอย่างเดียว

2.2.2.2 รูปทางเคมีของโลหะหนัก

การดูดดึงโลหะหนักโดยพืชนั้น ส่วนใหญ่แล้วโลหะหนักในรูปเกลืออนินทรีย์ (inorganic salt) ที่ละลายน้ำแล้วนั้นพืชจะสามารถดูดดึงเข้าไปได้มากกว่าโลหะหนักในรูปสารประกอบอินทรีย์ (organic compound)

2.2.2.3 ชนิดของพืช

พืชแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกันเป็นผลทำให้ความสามารถของพืชในการดูดดึงโลหะหนักแต่ละชนิดแต่ละรูปก็แตกต่างกันไปด้วย ตัวอย่างเช่น ในผักคะน้าจะมีความสามารถในการดูดดึง Zn ได้ดีที่สุดในรูป $ZnCl_2$

2.2.2.4 ลักษณะสมบัติบางประการของดิน

1) เนื้อดิน (soil texture) เนื้อดินที่แตกต่างกันก็ทำให้รากของพืชเข้าถึงและดูดดึงโลหะหนักได้ต่างกัน

2) การระบายน้ำ (drainage status) การที่ดินนั้นสามารถอุ้มน้ำไว้ได้มากก็จะทำให้โลหะหนักเหล่านั้นสามารถที่จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ง่ายขึ้น พืชก็จะสามารถดูดดึงไปได้มากขึ้น

3) ความสามารถในการดูดจับโลหะหนักไว้ในดิน (sorptive capacity) หากว่าดินดูดจับโลหะหนักไว้อย่างแน่นหนาแล้วโอกาสที่พืชจะดูดดึงไปได้ย่อมลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงมักจะพบว่าพืชสามารถดูดดึงและเคลื่อนย้ายโลหะหนักในดินทรายได้ดีกว่าในดินเหนียวอยู่เสมอ

2.2.2.5 สิ่งต่างๆ ที่เติมลงในดิน

สิ่งที่เติมเข้าไปในดินนั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงโลหะหนักในพืชมาก เนื่องจากสิ่งที่เติมเข้าไปนั้นอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของโลหะหนักและสารอาหารของพืชในดินทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงโละหนักที่ปนเปื้อนนี้ลดลง

2.2.2.6 สภาพแวดล้อมอื่นๆ

1) อุณหภูมิ (temperature) อุณหภูมิมีผลต่อพืชมาก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะพบว่าพืชจะดูดดึง Cd, Zn, Mn และ Fe จากดินสู่พืชมากขึ้น

2) ช่วงวัน (day length) ช่วงวันก็มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน โดยที่ช่วงวันมากขึ้นพืชก็จะมีโอกาสในการสังเคราะห์แสงมากขึ้น ทำให้โอกาสที่พืชจะดูดดึงเอาโลหะหนักออกมาจากดินนั้นมีสูงขึ้นด้วย

3) ความเข้มแสง (intensity) ปริมาณของแสงก็มีส่วนในการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน เนื่องจากแสงที่มีความเข้มพอเหมาะพืชก็จะสามารถสังเคราะห์แสงได้ดี ทำให้การดูดดึงโลหะหนักที่อยู่ในดินก็มีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4) ความชื้นในดิน (soil moisture) ความชื้นของดินก็มีส่วนที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักไปจากดิน โดยจะพิจารณาจากการ osmosis ซึ่งต้องมีความเหมาะสมของความชื้นในดิน พืชจึงจะดูดสารต่างๆออกจากดินได้

5) ความชื้นในอากาศ (air humidity) ก็มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักในดินเช่นกัน เนื่องจากความชื้นในอากาศนั้นมีผลต่อการคายน้ำของพืช ถ้าพืชคายน้ำออกมาได้น้อย แรงดึงที่รากก็จะต่ำทำให้พืชดูดดึงสารต่างๆในดินได้น้อยลงเช่นกัน

2.2.3 พืชที่มีลักษณะเหมาะสมในการบำบัดโลหะหนักโดยใช้พืช

ในการบำบัดโลหะหนักโดยใช้พืชนั้น สิ่งที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งก็คือ การเลือกชนิดของพืชที่จะนำมาใช้ในการบำบัด ซึ่งพืชแต่ละชนิดนั้นจะมีคุณสมบัติต่างกัน มีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดสารแต่ละชนิดแตกต่างกัน ในการเลือกพืชมาใช้ในการบำบัดโลหะหนักโดยใช้พืชนั้น เรามักจะเลือกใช้พืชที่มีคุณสมบัติพิเศษ ที่เรียกว่า hyperaccumulator

Hyperaccumulator หมายถึง พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักไว้ในปริมาณที่มากจนผิดปกติ เป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักไว้ได้มากกว่าปริมาณโลหะหนักในดินที่ปลูกถึง 100-1,000 เท่า หรือเป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้สูงกว่าพืชทั่วไป 10-500 เท่า (Reeves, and Baker, 2000) ซึ่งพืชที่เป็น hyperaccumulator จะมีลักษณะทั่วไปดังนี้

1) พืชชนิดนั้นควรมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในปริมาณมากเข้าสู่ภายในรากของพืชได้

2) พืชจะต้องมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากไปยังส่วนเหนือดินได้ในอัตราที่สูง

3) พืชชนิดนั้นต้องมีการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูง โดยเซลล์ที่รากและส่วนที่อยู่เหนือดินของพืชชนิดนั้น จะต้องสามารถทนความเข้มข้นของสารปนเปื้อนได้ในระดับที่สูงกว่าปกติ (hypertolerance) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจาก vacuolar compartmentalization คือ กระบวนการลดพิษของโลหะในพืชโดยอาศัยกลไกการขัดขวางของ vacuole เช่น ความสามารถในการสะสมสังกะสีได้ปริมาณที่สูงกว่าปกติของ *Thlaspi caerulescens* เกิดจากการที่สังกะสีไม่สามารถเคลื่อนที่ เนื่องจากตกผลึกอยู่ใน vacuole และ chelation ซึ่งเป็นการจับตัวกับสารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น phytochelatins แต่กลไกดังกล่าวยังไม่สามารถระบุได้แน่ชัด

พืชที่มีคุณสมบัติตามที่กล่าวมาในข้างต้นเพียง 2 ใน 3 อย่างก็สามารถนับว่าเป็น hyperaccumulator ได้แล้ว (Cunningham, 1995 cited in Brennan and Shelley, 1999)

2.2.4 กลไกการทนต่อโลหะหนักของพืช

พืชที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการทำ phytoextraction เพื่อบำบัดดินที่เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักนั้น นอกจากจะต้องมีคุณสมบัติในการสะสมโลหะหนักในเนื้อเยื่อพืชได้ในปริมาณที่สูงแล้ว ยังต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่ง นั่นก็คือพืชชนิดนั้นจะต้องมีความสามารถในการทนต่อความเข้มข้นของโลหะหนักที่เกิดการปนเปื้อนในดินนั้นได้เพื่อที่จะสามารถปลูกและเจริญเติบโตในพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนได้ โดยพืชแต่ละชนิด (species) มีความสามารถในการทนต่อโลหะหนักต่างกันตามเมทาบอลิซึมและองค์ประกอบของพืช (ยงยุทธ โอสถสภา, 2546) สำหรับการทนต่อโลหะหนักในพืชแต่ละชนิดนั้นก็มีกลไกแตกต่างกันไปตามชนิดของพืชเช่นกัน ซึ่งกลไกของการทนต่อโลหะหนักของพืชมี 4 อย่างได้แก่

1) Exclusion เป็นวิธีการที่พืชจะจดจำโลหะหนักชนิดนั้นๆ ซึ่งพืชจะทำการป้องกันและลดการดูดดึงโลหะหนักนั้นๆ ให้น้อยลง

2) Amelioration เป็นวิธีการที่พืชจะลดผลของความเป็นพิษจากการดูดดึงโลหะหนักเข้าไปโดยวิธีการต่างๆ เช่น การสร้างคีเลต การแพร่ไปสู่เนื้อเยื่อบริเวณอื่น การย่อยสลาย การระเหย และหลั่งโลหะหนักเหล่านั้นออกสู่ภายนอก เป็นต้น

3) Avoidance เป็นวิธีการที่พืชสร้างสารเคมีที่มีผลทางกายภาพบางอย่างออกมาเพื่อป้องกันไม่ให้พืชได้รับผลกระทบจากสภาวะของความเป็นพิษของโลหะหนัก

4) Evasion เป็นวิธีการที่พืชทำการเคลื่อนย้ายเพื่อหลบหนีออกจากบริเวณที่มีความเป็นพิษของโลหะหนัก (Medina et al., 2003)

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่า กลไกที่ทำให้พืชสามารถทนต่อโลหะหนักของพืชได้นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งกลไกบางอย่างก็ไม่เหมาะสมสำหรับในการเลือกพืชเพื่อนำมาใช้ในการทำ phytoextraction กล่าวคือ ในกลไก exclusion หากพืชมีการลดปริมาณการดูดดึงโลหะหนักเข้าสู่พืชก็จะมีผลทำให้ปริมาณของโลหะหนักในพืชมีปริมาณน้อยไม่เหมาะแก่การทำ phytoextraction สำหรับกลไก evasion พืชจะเคลื่อนย้ายออกจากพื้นที่ที่ต้องการบำบัดทำให้ไม่สามารถบำบัดในพื้นที่ที่ต้องการได้ ฉะนั้นกลไกที่เหมาะสำหรับพืชที่จะนำมาใช้ในการทำ phytoextraction ก็คือ amelioration และ avoidance

จากการศึกษาของ Wang และคณะ (2004) พบว่าพืชที่มีสมบัติในการเป็น hyperaccumulator ซึ่งได้แก่ *Brassica juncea* มีกลไกในการทนต่อโลหะหนักทองแดงแบบ amelioration กล่าวคือในส่วนรากของ *Brassica juncea* มีการสร้างเอนไซม์เพื่อต่อต้านความเป็นพิษ

ของโลหะหนัก โดยที่ในสภาวะที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินนี้จะก่อให้เกิดการกระตุ้นการสร้างอนุมูลอิสระ (free radical) ภายในเซลล์ของพืชเพิ่มขึ้น (Gupta et al., 1999; Cuyers, Vangronsveld, and Clijsters, 2000) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้จะเข้าทำลายเซลล์ของพืช (De Vos, 1991) การสร้างเอนไซม์ต่อต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant enzymes) ของ *Brassica juncea* จะเข้าทำการกำจัดสารอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเหล่านี้

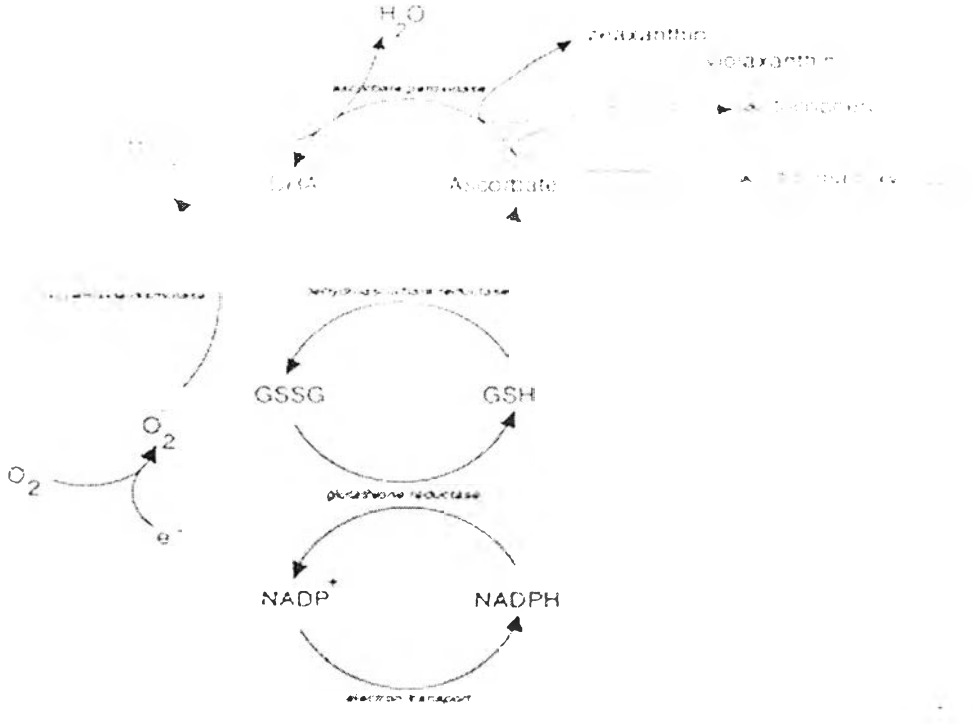
กลไกของการต่อต้านอนุมูลอิสระนี้เริ่มจาก superoxide dismutase (SOD) จะเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยน superoxide anion ซึ่งมีความมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูงให้กลายเป็น hydrogen peroxide (H_2O_2) ที่เป็นผลผลิตที่มีความเสถียรมากกว่า ดังสมการ

$$2O_2^- + 2H^+ \xrightarrow{\text{SOD}} O_2 + H_2O_2$$

แต่ H_2O_2 เองก็ยังมีความเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อของพืช ดังนั้นจึงมีเอนไซม์ที่จะทำหน้าที่ในการที่จะเปลี่ยน H_2O_2 ให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยลงซึ่งได้แก่ ascorbate peroxidase (APX), catalase (CAT) และ peroxidase (POD) โดยที่ ascorbate peroxidase สามารถกำจัด H_2O_2 ได้ดังสมการ

$$2 \text{ ascorbate} + H_2O_2 \xrightarrow{\text{APX}} 2 \text{ monodehydroascorbate} + 2H_2O$$

จากนั้น dehydroascorbate (DHA) จะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็น oxidized glutathione โดย dehydroascorbate reductase ซึ่ง oxidized glutathione นี้จะถูก glutathione reductase (GR) เปลี่ยนให้เป็น reduced glutathione ซึ่งเป็นสาร antioxidants ซึ่งมีความสำคัญต่อการสร้างอนุมูลอิสระ ซึ่งปฏิกิริยาที่กล่าวมาในข้างต้นนี้เกิดขึ้นใน ascorbate-glutathione cycle (Harinasut et al., 2003) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Ascorbate-glutathione cycle และปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง (Foyer, and Mullineaux, 1994)

จากที่กล่าวมาในข้างต้นนอกจากเอนไซม์ใน ascorbate-glutathione cycle ที่มีความสามารถในการกำจัด H_2O_2 ที่เกิดขึ้นแล้ว ยังมีเอนไซม์ catalase (CAT) และ peroxidase (POD) ที่สามารถกำจัด H_2O_2 ที่เกิดขึ้นได้ โดยที่ catalase มีหน้าที่ในการกำจัด H_2O_2 ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา β-oxidation ใน peroxisomes, glycolate cycle (photorespiration) และ purine catabolism ดังสมการ

$$RH_2 + H_2O_2 \longrightarrow R + 2H_2O$$

$$2H_2O_2 \longrightarrow 2H_2O + O_2$$

$$CAT\text{-}Fe\text{-}OH + H_2O_2 \longrightarrow CAT\text{-}Fe\text{-}OOH + H_2O$$

$$CAT\text{-}Fe\text{-}OOH + RH_2 \longrightarrow CAT\text{-}Fe\text{-}OH + H_2O - O_2$$

(Peroxidatic Rx)

$$CAT\text{-}Fe\text{-}OOH + H_2O_2 \longrightarrow CAT\text{-}Fe\text{-}OH + H_2O - O_2$$

(Catalatic Rx)

สำหรับ peroxidase (POD) เป็นเอนไซม์ใช้ในการสลาย H_2O_2 โดยอาศัย donor ซึ่งได้แก่ pyrogallol, ascorbate และ guaiacol เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาจะเป็นดังสมการ

$$\text{donor} + H_2O_2 \longrightarrow \text{oxidized donor} + H_2O$$

(guaiacol) (tetraguaiacol)

โดยที่เอนไซม์ใน ascorbate-glutathione cycle, catalase และ peroxidase จะร่วมกันกำจัด H_2O_2 ที่เกิดขึ้น (Foyer, and Mullineaux, 1994) สำหรับในส่วนรากของ *Brassica juncea* ก็มีกลไกในการต่อต้านอนุมูลอิสระที่เกิดจากความเข้มข้นของทองแดงเช่นกัน กล่าวคือ หลังจากที่ *Brassica juncea* ได้รับทองแดง 8 μM พบว่า ในส่วนรากของ *Brassica juncea* มีการสร้างเอนไซม์ superoxide dismutase เป็น 2 เท่าในช่วง 2 วันแรก ในขณะที่พบว่าปฏิกิริยาของ ascorbate peroxidase และ guaiacol peroxidase มีกิจกรรมของเอนไซม์ลดลงใน 4 วันแรก แต่มีการเพิ่มขึ้นหลังจากนั้น สำหรับใน catalase พบว่ามีกิจกรรมของเอนไซม์คงที่ แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรก *Brassica juncea* มีการเปลี่ยน oxygen radical ให้กลายเป็น H_2O_2 โดย superoxide dismutase เมื่อปริมาณของ H_2O_2 มากขึ้น จะเกิดการกระตุ้นทำให้ ascorbate peroxidase และ guaiacol peroxidase มีการทำงานเพิ่มสลาย H_2O_2 ที่เกิดขึ้น เพื่อต่อต้านสภาวะที่มีความเข้มข้นของทองแดงในดินนั่นเอง (Wang et al., 2004)

2.3 ทองแดง

2.3.1 ธรรมชาติของทองแดง

2.3.1.1 ประวัติการค้นพบทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะชนิดแรกๆ ที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้งาน โดยมนุษย์ได้ใช้งานทองแดงมานานกว่าโลหะทุกชนิดยกเว้นทองคำ (สุวิชช์ สัมปัตตะวนิช และงามพิศ อังคทะวานิช, 2518) จากหลักฐานพบว่า มนุษย์รู้จักการถลุงทองแดงขึ้นมาใช้ทำเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ มาตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์แม้ว่าทองแดงจะมีปริมาณน้อยมากในเปลือกโลก (มีเพียงประมาณ 0.0001%) เมื่อเทียบกับโลหะอื่น กล่าวคือทองแดงจัดว่ามีปริมาณอยู่ในอันดับที่ 26 ใน lithosphere รองจากสังกะสี (Alloway, 1993) ทองแดงเป็นโลหะที่สามารถพบได้ทั้งในรูปอิสระและในรูปสารประกอบ ทองแดงสามารถถลุงออกมาเป็นโลหะได้ง่าย การถลุงทองแดงในปัจจุบันจะนำสินแร่ทองแดง เช่น แร่ชาลโคไซต์ (chalcocite, Cu_2S) แร่ชาลโคไพไรต์ (chalcopyrite, $CuFeS_2$) ฯลฯ มาเผาในอากาศ จะได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ประมาณ 97-99% จากนั้นจึงนำทองแดงที่ได้มาผ่านกระบวนการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง ก็จะได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99% (สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล, 2548)

ปัจจุบัน ทองแดงได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อใช้ในการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า นอกจากนี้ทองแดงยังใช้เป็นส่วนผสมของยาถ่ายพยาธิ ยาฆ่าเชื้อรา ยารักษาแผลไฟไหม้ ใช้เติมอาหาร เช่น ถั่ว กระป๋อง ผลไม้แช่อิ่ม ฯลฯ อีกด้วย (อรรณพ หอมจันทร์, 2544)

2.3.1.2 คุณสมบัติของทองแดง

ทองแดงมีหมายเลขอะตอม (atomic number) 29 มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) 63.546 เป็นธาตุตัวแรกใน subgroup 1B ของตารางธาตุ มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^2$, $3p^6$, $3d^{10}$, $4s^1$ (Alloway, 1993) ทองแดงเป็นธาตุทรานซิชัน (transition element) ที่มีคุณสมบัติคล้ายเหล็กในแง่ทำปฏิกิริยาให้สารเชิงซ้อนที่มีเสถียรภาพมาก โดยมีการโอนถ่ายอิเล็กตรอนดังนี้

$$Cu^{2+} \underset{-e^-}{\overset{+e^-}{\rightleftharpoons}} Cu^{+}$$

ทองแดงในรูปของคิวปริกไอออน (Cu^{2+}) มีความเสถียรมากกว่ารูปของคิวปรัสไอออน (Cu^{+}) แต่อาจจะถูกรีดิวซ์มาอยู่ในรูปของคิวปรัสไอออนได้ ถึงแม้ว่าคิวปรัสไอออนจะเป็นรูปที่ไม่มีเสถียรภาพก็ตาม (ยงยุทธ โอสถสภา, 2546)

ทองแดงเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวทั้งในทางกายภาพและในทางการนำไปใช้ผสมโลหะ ซึ่งคุณสมบัติเด่นๆ ที่ทำให้ทองแดงนิยมนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ก็คือ ความสามารถในการนำไฟฟ้าของทองแดง นอกจากนี้ทองแดงยังมีคุณสมบัติของการนำความร้อนสูง ทนต่อการสึกกร่อน มีความอ่อนตัวที่ทำให้เป็นเส้นได้ง่าย มีความแข็งแรงสูง และไม่เป็นแม่เหล็ก (สุวิชช์ สัมปัตตะวนิช และงามพิศ อังคทะวานิช, 2518)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของทองแดง (ดัดแปลงจาก สุวิชช์ สัมปัตตะวนิช และงามพิศ อังคทะวานิช, 2518)

คุณสมบัติ	ค่าแสดงผล
1. สัญลักษณ์ทางเคมี	Cu
2. ความแข็งตามสเกลของมอห์ (Mohs' scale)	2.5-3.0
3. จุดเดือด (boiling point)	2,595°C
4. จุดหลอมเหลว (melting point)	1,083°C
5. ความหนาแน่น	8.89
6. ความต้านทานไฟฟ้า (electrical conductivity)	1.71 ที่ 20°C

2.3.1.3 ทองแดงในดิน

ทองแดงตามธรรมชาตินั้นมีต้นกำเนิดมาจากสินแร่ปฐมภูมิที่อยู่ในรูปของซัลไฟด์ เมื่อถูกสภาพความเป็นกรดก็จะสลายตัวถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของไอออน ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับแร่และอินทรียสารต่างๆ ในดินตกตะกอนอยู่ภายในดิน สำหรับรูปไอออนของทองแดงที่พบมากที่สุดจะพบในรูปของคิวปริกไอออน (Cu^{2+}) (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) โดยที่รูปของทองแดงในดินซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้ในดินที่มีความเป็นกรดจะมักพบอยู่ในรูปของ $[Cu(H_2O)_6]^{2+}$ และในดินที่มีความเป็นกลางและด่างทองแดงที่พืชสามารถนำไปใช้ได้จะอยู่ในรูปของ $Cu(OH)_2$ (Alloway, 1993) ส่วนปริมาณของทองแดงในดิน ตามปกติมีค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 9 ถึง 29 mg/kg โดยที่มีค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่ระหว่าง 13 ถึง 24 mg/kg (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

ตารางที่ 2.2 รูปของทองแดงที่พบได้ในดิน (ดัดแปลงจาก ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

รูปแบบของทองแดง	รูปของทองแดงที่พบในดิน
1. รูปแคตไอออน	Cu^{2+}, Cu^{+}, $CuOH^{+}$, $Cu(OH)_2^{2+}$
2. รูปแอนไอออน	$HCuO_2^{-}$, CuO_2^{2-}, $Cu(OH)_3^{-}$, $Cu(OH)_4^{2-}$, $Cu(CO_3)_2^{2-}$
3. รูปสารประกอบ	$CuCO_3$, $Cu(OH)_2CO_3$

2.3.1.4 ทองแดงในพืช

ทองแดงเป็นหนึ่งในจุลธาตุที่สำคัญของพืช ซึ่งพืชจะใช้ในปริมาณเล็กน้อยในการเจริญเติบโต แต่ก็ไม่สามารถขาดได้ โดยที่พืชจะใช้ทองแดงที่ได้รับเปลี่ยนไปเป็นองค์ประกอบต่างๆ ที่สำคัญในพืชโดยเฉพาะอย่างยิ่งเอนไซม์ต่างๆ ถ้าหากทองแดงมีปริมาณไม่พอเพียงต่อความต้องการของพืชแล้ว ก็จะส่งผลทำให้พืชมีอัตราการเจริญเติบโตลดลง อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยทองแดงเป็นจุลธาตุที่พืชต้องการ แต่ช่วงปริมาณที่พืชต้องการทองแดงนั้นเป็นช่วงที่แคบมาก ดังนั้นหากพืชได้รับทองแดงในปริมาณที่มากเกินพิกัดบน (maximum limit) ของพืช พืชนั้นก็จะแสดงความเป็นพิษออกมา หากพืชได้รับทองแดงในปริมาณที่น้อยกว่าพิกัดล่าง (minimum limit) ของพืช พืชนั้นก็จะแสดงอาการของการขาดแคลนธาตุอาหารออกมา (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

สำหรับอาการของพืชที่ขาดทองแดงนั้นแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช กล่าวคือ ในพืชยืนต้นอาการขาดทองแดงจะแสดงออกให้เห็นโดยมีต้นแคระแกร็น ใบอ่อนบิดเบี้ยว เยื่อเจริญที่ยอดตาย ใบอ่อนสีเหลืองซีด ปลายกิ่งแห้งแล้วลุกลามมาถึงโคนกิ่ง สำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจะมีการแตกแขนงมาก ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่จะมีการแตกตาข้างมากจึงมีจำนวนยอดมากกว่าปกติ นอกจากนี้อาการใบอ่อนเหี่ยวง่ายก็นับเป็นอาการอย่างหนึ่งของการขาดทองแดง ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะไซเลมเวสเซลมีลิกนินไม่พอทำให้ท่อลำเลียงน้ำไม่ดี น้ำจึงเคลื่อนไปถึงส่วนยอดของพืชได้ไม่เพียงพอ (ยงยุทธ โอสถสภา, 2546)

ส่วนพืชที่ได้รับทองแดงในปริมาณมากเกินพิกัดบนก็จะแสดงความเป็นพิษออกมา โดยที่ระดับความเป็นพิษขั้นวิกฤต (critical toxicity level) ในพืชทั่วไปอยู่ระหว่าง 20-30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง โดยพืชที่ได้รับทองแดงในระดับที่เป็นพิษจะมีอัตราการเจริญเติบโตลดลง ปริมาณของธาตุเหล็กในพืชลดลง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการแสดงอาการขาดธาตุเหล็ก และภาวะพร่องคลอโรฟิลล์ (chlorosis) เกิดขึ้น

ในการทดสอบความเป็นพิษของทองแดงต่อมะเขือเทศ ที่ได้ทดสอบโดยปลูกมะเขือเทศในสารละลายที่มีทองแดง 250 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่ามีการชะงักของการเจริญเติบโตของรากก่อนส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ทั้งนี้ไม่ใช่เพราะรากไวต่อความเป็นพิษของทองแดงมาก แต่เนื่องจากในสภาวะดังกล่าวรากจะสะสมทองแดงไว้ได้มาก โดยความเข้มข้นของทองแดงในรากเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายภายนอก และการเคลื่อนย้ายของทองแดงจากส่วนรากไปยังส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินช้ามาก ดังนั้นในการประเมินความเป็นพิษของทองแดงระหว่างพันธุ์พืชควรตรวจสอบปริมาณของทองแดงในรากด้วย เนื่องจากความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินไม่ใช่ดัชนีที่สามารถชี้วัดได้อย่างชัดเจน สำหรับในพืชที่ไม่มีความทนต่อความเป็นพิษของทองแดง เมื่อได้รับทองแดงมากถึงระดับหนึ่งเนื้อเยื่อของรากจะ

ได้รับความเสียหายและมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานที่ชัดเจนคือ รากไม่มีการยืดตัวและมีการแตกแขนงของรากมากขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลเนื่องมาจากกิจกรรมของเอนไซม์ IAA ออกซิเดสในรากลดลง (ยงยุทธ โอสถสภา, 2546)

สำหรับความเป็นพิษของทองแดงในผักกาดเขียวปลีก็ให้ผลใกล้เคียงในมะเขือเทศ กล่าวคือ เมื่อปลูกผักกาดเขียวปลีในสารละลายทองแดงความเข้มข้น 8 μM พบว่าน้ำหนักแห้งส่วนรากของผักกาดเขียวปลีมีการลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกในสารอาหารปกติ (Wang et al.. 2004)

ในพืชบางชนิดพบว่ามีความสามารถทนทานต่อความเป็นพิษของทองแดงได้มากกว่าพืชปกติทั่วๆ ไป โดยที่พืชเหล่านี้มีกลไกที่ช่วยให้พืชทนต่อพิษของทองแดงดังต่อไปนี้

1) ควบคุมให้ทองแดงอยู่ในผนังเซลล์ แต่กลไกนี้สามารถช่วยได้ในระดับหนึ่งเนื่องจากประจุที่ใช้ในการยึดเหนี่ยวทองแดงนั้นมีจำกัด

2) จำกัดการดูดหรือการขับทองแดงออกไป สำหรับกลไกนี้ไม่ค่อยมีบทบาทในพืชชั้นสูง

3) ขับทองแดงออกโดยกลไกแบบแอกทีฟ (active efflux)

4) ให้ทองแดงรวมตัวกับอินทรียสารที่ไม่ละลายหรืออินทรียสารที่ละลายน้ำได้แล้วนำไปเก็บให้อยู่เฉพาะบางบริเวณ (compartmentation) ของเซลล์ บริเวณที่กักเก็บก็คือแวคิวโอลนั่นเอง กลไกนี้มีความสำคัญมากในการลดความเป็นพิษของโลหะหนัก โปรตีนที่มีบทบาทโดยตรงคือ ไฟโทคีเลทิน (phytochelatins) หรือเมทาลโลไทโอเนอีน (metallothioneins) สำหรับพืชที่ทนต่อพิษของทองแดงนั้น เมื่อได้รับทองแดงเข้ามามากๆ ก็จะสังเคราะห์เมทาลโลไทโอเนอีนออกมารองรับ โปรตีนดังกล่าวมีกรดอะมิโนซีสเทอีน (cysteine) มากและมีสัมพรรคภาพสูงต่อทองแดงจึงจับธาตุนี้ได้เหนียวแน่นกว่าสังกะสีหรือแคดเมียม พืชที่ทนต่อทองแดงชนิดหนึ่งคือ *Agreostis* นั้นเมทาลโลไทโอเนอีนถึง 20.8% โดยที่เมทาลโลไทโอเนอีน 1 กรัมสามารถจับกับทองแดงได้ถึง 54 มิลลิกรัม นอกเหนือจากเมทาลโลไทโอเนอีนแล้วพืชยังสามารถสังเคราะห์โปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าออกมาต้านพิษจากทองแดงได้ด้วย

5) มีปฏิกิริยาคีเลชันระหว่างทองแดงกับอินทรียสารตรงบริเวณระหว่างผนังเซลล์กับเยื่อหุ้มเซลล์

6) มีปฏิกิริยาคีเลชันระหว่างทองแดงกับอินทรียสารในไซโทพลาสซึม (ยงยุทธ โอสถสภา. 2546)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.2 อันตรายจากทองแดงที่มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

ดินที่มีการปนเปื้อนของทองแดงในปริมาณสูงนั้นจะมีปริมาณของแบคทีเรียในดินลดลง แต่ปริมาณของเชื้อราในดินมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักถึงแม้ว่าพิษของทองแดงจะมีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราในช่วงเจริญวัยก็ตาม สำหรับพืชนั้นพบว่าพืชจะมีการสะสมปริมาณทองแดงในพืชมากขึ้นจากที่ปกติพืชจะดูดดึงทองแดงไปสะสมในปริมาณไม่มากนัก อย่างเช่น ในวัชพืชพบว่ามีการสะสมทองแดงไว้ที่รากมากขึ้น แต่ปริมาณของทองแดงในใบนั้นไม่เพิ่มขึ้นแต่อย่างใด (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

สำหรับในสัตว์ที่กินหญ้าที่มีทองแดงเข้าไป อย่างเช่น ในกลุ่มของสัตว์เคี้ยวเอื้อง จำพวกแกะจะเกิดการสะสมทองแดงในตับและพบอาการฮีโมลัยติกไครซีส (haemoplytic crisis) กล่าวคือ ทองแดงที่สะสมอยู่ในตับด้วยปริมาณสูงนั้นจะถูกขับออกมาจากตับมาอยู่ในกระแสโลหิต และทำให้เม็ดเลือดแตกตัว พบอาการดีซ่านและโลหิตจาง เนื้อไตและตับตาย โดยที่จะพบอาการดังกล่าวได้ในแกะที่ได้รับทองแดงขนาดสูง 8–10 mg/kg และได้รับโมลิบดินัมต่ำกว่า 0.5 mg/kg ซึ่งอาการในแกะที่มีการขาดทองแดงจะมีลักษณะเหมือนอาการพิษของโมลิบดินัม และอาการในแกะที่ขาดโมลิบดินัมก็จะเหมือนอาการพิษของทองแดงเช่นกัน ในอาหารที่มีทองแดง 25-30 mg/kg แต่มีโมลิบดินัมต่ำ คือ ประมาณ 1–2 mg/kg ทำให้เกิดอาการพิษเนื่องจากทองแดงในสัตว์โดยเฉพาะแกะ ดังนั้นสัดส่วนของทองแดงต่อโมลิบดินัมจึงสำคัญมาก

สำหรับอาการของมนุษย์ที่ได้รับทองแดงในปริมาณที่เป็นพิษจะแสดงอาการต่างกันตามวิธีการที่ได้รับ กล่าวคือ ถ้าได้รับทางการหายใจ จะทำให้คัดจมูก เป็นแผลที่เพดานปาก ถ้าได้รับโดยการกินในปริมาณสูง จะมีอาการคลื่นไส้อาเจียน ปวดท้อง เลือดออกในกระเพาะอาหาร กระหายน้ำ อาเจียนมีสีเขียว ปัสสาวะเป็นไข่ขาวมีสีเขียวเข้ม (อาจเสียชีวิตใน 4 ชั่วโมง) มีอาการทางประสาท ชัก เพ้อ เป็นอัมพาต ทรงตัวไม่ได้ มีอาการดีซ่าน ถ้าได้รับโดยการดูดซึมผ่านทางผิวหนังจะทำให้เกิดอาการคัน ผิวหนังเป็นตุ่ม ถ้าเข้าตาจะทำให้เยื่อตาอักเสบ หนังตาบวม เป็นแผลที่ตาดำ บางรายมีการสะสมในเนื้อเยื่อทำให้มีสีเขียวที่โคนผมและที่เหงือก สำหรับพิษเรื้อรังไม่ค่อยปรากฏให้เห็น (อรรณพ หอมจันทร์, 2544)

2.4 พืชที่ใช้ในการบำบัดทองแดงในดิน

2.4.1 การคัดเลือกพืชที่นำมาใช้ในงานวิจัย

การเลือกพืชที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้นับเป็นประเด็นสำคัญมากในการวิจัยเกี่ยวกับ phytoremediation เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีความทนต่อความเข้มข้นของโลหะหนักได้แตกต่างกัน รวมถึงมีความสามารถในการบำบัดโลหะหนักที่เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้ต่างกัน ดังนั้น ชนิดของพืชที่เลือกมาใช้ในงานวิจัยจัดเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในงานเกี่ยวกับ phytoremediation

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้กำหนดว่าจะทำการคัดเลือกพืช 3 ชนิด โดยพืชชนิดแรกเป็นพืชที่มีข้อมูลเกี่ยวกับการใช้ในการบำบัดทองแดงมาก่อนแล้ว เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับพืชอีก 2 ชนิดที่ยังไม่ทราบถึงประสิทธิภาพของการนำมาใช้ในการบำบัดทองแดงในดิน ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวก็คือ ผักกาดเขียวปลี สำหรับพืชอีก 2 ชนิดที่เหลือจะเลือกพืชที่มีการเจริญเติบโตเร็ว มีวงชีวิตสั้น มีความทนต่อสภาพแวดล้อม และพบได้ทั่วไปในประเทศไทย ซึ่งพืชที่มีลักษณะดังกล่าวก็คือ วัชพืช ดังนั้นพืชที่ถูกคัดเลือกมาก็คือ ต้อยติ่ง และไมยราบ

จากการสำรวจเอกสารพบว่า ผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) อยู่ในวงศ์ Brassicaceae เป็นพืชที่มีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักได้หลายชนิด (McIntyre, 2003) มีน้ำหนักแห้งในปริมาณที่สูงและสามารถทำการเก็บเกี่ยวได้ง่าย (Salt et al., 1994) จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นพืชต้นแบบในการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสะสมทองแดงกับวัชพืชอีก 2 ชนิด คือ ต้อยติ่ง (*Ruellia tuberosa*) ซึ่งเป็นพืชในวงศ์ Acanthaceae และไมยราบ (*Mimosa pudica*) ซึ่งเป็นพืชในวงศ์ Fabaceae

จากการศึกษาพบว่าพืชในวงศ์ Acanthaceae เช่น *Ruellia geminiflora* มีความสามารถในการเป็น metal hyperaccumulator (Chancy et al., 2002) ส่วนไมยราบเป็นพืชที่ใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารหนูได้ (Visoottiviseth et al., 2002) นอกจากนี้ยังพบว่าพืชในวงศ์ Fabaceae ได้แก่ *Anthyllis* sp., *Pearsonia metallifera* และ *Trifolium pallescens* ยังเป็น nickel hypperaccumurator อีกด้วย (Reeves, and Baker, 2000) ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำพืชทั้ง 3 ชนิด คือ ผักกาดเขียวปลี ต้อยติ่ง และไมยราบมาใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการสะสมทองแดงเพื่อนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนทองแดงในพื้นที่จริงต่อไป

อย่างไรก็ตามแม้ว่าผักกาดเขียวปลีจะมีความเหมาะสมในเรื่องของการเป็น copper hyperaccumulator ก็ตาม แต่ในการนำไปใช้ในพื้นที่จริงนั้นอาจจะไม่เหมาะสมนัก เนื่องจากผักกาดเขียวปลีเป็นพืชที่มนุษย์และสัตว์เลี้ยงสามารถบริโภคได้ ดังนั้นในการปลูกในพื้นที่จริงจึงมีปัญหาในเรื่องของการดูแลควบคุมไม่ให้มนุษย์หรือสัตว์เลี้ยงต่างๆ มากินผักกาดเขียวปลี โดยที่หากมนุษย์หรือสัตว์เลี้ยงบริโภคผักกาดเขียวปลีที่มีการสะสมของทองแดงเข้าไปในปริมาณมากอาจจะ

ทำให้เกิดอันตรายจนถึงขั้นเสียชีวิตได้ ดังนั้นในการทำ phytoremediation ในพื้นที่จริงเพื่อให้ผลที่ดีและสามารถควบคุมได้ง่าย จึงควรเลือกใช้พืชที่ทั้งมนุษย์และสัตว์เลี้ยงไม่สามารถบริโภคได้ อย่างเช่น วัชพืช มาใช้ในการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนทองแดงในพื้นที่จริง จะสามารถทำให้ดูแลตลอดระยะเวลาการบำบัดได้ง่ายขึ้น

สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดทองแดงในพืชจะมีในช่วงก่อนที่พืชจะเข้าสู่ระยะออกดอกที่ทำให้พืชมีอัตราการดูดดึงและขนย้ายทองแดงในพืชลดลง (Jones, 1998) ซึ่งในผักกาดเขียวปลีจะให้ผลผลิตและเข้าสู่ระยะออกดอกหลังจากการงอก 60 วัน (ไฉน ยอดเพชร, 2542) สำหรับด้อยติ่งจะเข้าสู่ระยะออกดอกหลังจากการงอกประมาณ 60 วันเช่นกัน แต่ไมยราบจะเข้าสู่ระยะออกดอกหลังจากการงอกประมาณ 90 วัน ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสะสมทองแดงในพืชทั้ง 3 ชนิดเพื่อให้ผลที่แน่นอน จึงควรกำหนดระยะเวลาเก็บเกี่ยวครั้งสุดท้ายไม่เกิน 60 วันหลังการงอก โดยในงานวิจัยนี้จึงออกแบบการทดลองให้เก็บเกี่ยวครั้งสุดท้ายที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 60 วัน โดยทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะเวลา 40 และ 50 วันด้วยเพื่อที่จะสามารถตรวจวัดอัตราการสะสมของทองแดงในพืชทั้ง 3 ชนิดนี้ได้

2.4.2 ผักกาดเขียวปลี (Indian mustard)

ผักกาดเขียวปลี (Leave mustard) เป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ Brassicaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Brassica juncea* (L.) Czern มีถิ่นกำเนิดในประเทศจีน จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Chinese mustard โดยที่พืชที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในกลุ่ม Indian mustard หรือ Brown mustard ซึ่งเป็นพืชผักพวกมีสาร 3-Butelyl isothiocyanate สูง มีการปลูกมากในประเทศจีน อินเดีย เนปาล และบังกลาเทศ โดยปลูกเพื่อใช้สำหรับเป็นอาหารและสกัดน้ำมันออกจากเมล็ด (ไฉน ยอดเพชร, 2542; มณีฉัตร นิกรพันธุ์, 2545)

รูปที่ 2.5 ผักกาดเขียวปลี

2.4.2.1 สภาพแวดล้อมที่ผักกาดเขียวปลีต้องการ

1) สภาพของดินที่ปลูก ผักกาดเขียวปลีเจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนปนทราย และมีการระบายน้ำที่ดี อย่างไรก็ตามในดินร่วนปนดินเหนียวหากมีการใช้ปุ๋ยอินทรีย์และปูนขาวในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้มีความเหมาะสมต่อการปลูกผักกาดเขียวปลีมากขึ้น เนื่องจากดินร่วนปนดินเหนียวนั้นมีความอุดมสมบูรณ์สูงอยู่แล้ว สำหรับค่า pH ของดินที่มีความเหมาะสมต่อการปลูกผักกาดเขียวปลี คือ 6-6.50

2) อุณหภูมิ ผักกาดเขียวปลีพันธุ์ห่อปลีต้องการอุณหภูมิต่ำคล้ายกะหล่ำปลี เพื่อให้ได้ผลผลิตสูงและคุณภาพดี ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 15-20 °C

3) ความชื้นในดิน ผักกาดเขียวปลีต้องการความชื้นในดินสูงเพื่อการเจริญเติบโตและการห่อปลี (ไฉน ยอดเพชร, 2542)

2.4.2.2 การปลูกผักกาดเขียวปลี

1) ฤดูปลูก ผักกาดเขียวปลีชนิดไม่ห่อปลีสามารถปลูกได้ในทุกฤดูกาล ถ้ามีน้ำเพียงพอ และสามารถจัดการกับโรคและแมลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถ้าเป็นพันธุ์ห่อปลีสามารถปลูกได้ผลดีในฤดูหนาวและฤดูฝนเพียงแต่ผลผลิตที่ได้ในฤดูหนาวจะได้มากกว่าในฤดูฝน

2) การเตรียมดินปลูก

(1) ไถหรือขุดดินลึก 20-30 เซนติเมตร ตากแดดทิ้งไว้ 7-15 วัน

(2) พรวนหรือย่อยดินให้ละเอียด

(3) ทำรูปแปลงสำหรับเพาะ

(4) ขนาดของแปลงเพาะกว้าง 1 เมตร ความยาวประมาณ 6-10 เมตร ทางเดิน 50 เซนติเมตร

(5) ใส่ปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยหมักแปลงละ 100-150 กิโลกรัม คลุกให้ทั่วกันทั้งแปลง

(6) ฆ่าเชื้อโรคและแมลงในดินด้วยสารเคมีเมทิลโบรไมด์ถ้าจำเป็น

(7) เนื่องจากผักกาดเขียวปลีมักแสดงอาการขาดธาตุโบรอนเสมอ ดังนั้นในการเตรียมดินจึงควรใส่ธาตุโบรอนในรูปของโบแรกซ์ อัตรา 2-4 กิโลกรัมต่อไร่ในขณะการเตรียมดินครั้งสุดท้ายเพื่อป้องกันการขาดธาตุโบรอน

3) ระบบการปลูก ในการปลูกผักกาดเขียวปลีนั้นจะมีระบบการปลูกตามสภาพของพื้นที่เพาะปลูกดังนี้

(1) การปลูกแบบร่องสวน ใช้กับการปลูกผักกาดเขียวปลีตามที่ลุ่มน้ำขัง อย่างเช่น บริเวณชานเมืองกรุงเทพฯ โดยการขุดคูระบายน้ำเพื่อทำแปลงปลูก หรือยกร่องปลูก ความกว้างประมาณ 5-6 เมตร ความยาวขึ้นอยู่กับความต้องการ ซึ่งสภาพพื้นที่เป็นคูระบายน้ำนี้ช่วยระบายน้ำออกและนำน้ำขังได้เมื่อต้องการ การปลูกในระบบนี้มักปลูกแบบหว่านด้วยเมล็ด หรือหยอดเมล็ดเป็นแถว

(2) การยกแปลงปลูกแบบแถวคู่ ระบบนี้เหมาะสำหรับการทำสวนผักกาดเขียวปลีที่ปลูกด้วยต้นกล้าและหยอดด้วยเมล็ดโดยตรง การเตรียมดินในระยะแรกจะใช้เครื่องมือทุ่นแรงจากนั้นใช้แรงงานคนยกแปลงปลูก โดยใช้แปลงกว้าง 1 เมตร ความยาวแล้วแต่ต้องการ และใช้ระบบปลูกบนแปลงแถวคู่ 50 x 50 เซนติเมตร

(3) การปลูกแบบไร่ เมื่อทำการไถและพรวนดินเรียบร้อยแล้วให้ย้ายกล้าที่เตรียมไว้ไปปลูกได้เลย

4) ระยะปลูก ระยะการปลูกของผักกาดเขียวปลี 50 x 50 เซนติเมตร

5) วิธีการปลูก การปลูกผักกาดเขียวปลีสามารถทำได้ 3 วิธี ได้แก่

(1) การปลูกแบบหว่านเมล็ด ใช้การหว่านเมล็ดให้กระจายไปทั่วทั้งแปลง วิธีนี้เป็นที่นิยมในการใช้ปลูกในระบบการปลูกแบบร่องสวนที่เป็นแปลงปลูกขนาดใหญ่ หลังการหว่านเมล็ดให้ใช้ปุ๋ยอินทรีย์โรยข้างบางๆ จากนั้นใช้ฟางข้าวหรือหญ้าแห้งคลุมเพื่อรักษาความชุ่มชื้นและป้องกันการงอกของวัชพืช

(2) การปลูกแบบหยอดเมล็ดเป็นจุดหรือเป็นหลุม วิธีนี้เมื่อทำการเตรียมแปลงเรียบร้อยแล้วให้ทำหลุมลึกประมาณ 1-2 เซนติเมตร แปลงกว้าง 1 เมตรจะปลูกได้ 2 แถว โดยใช้ระยะปลูกระหว่างแถว 50 เซนติเมตร ระยะห่างของแต่ละหลุมห่างกัน 50 เซนติเมตร

(3) การปลูกด้วยต้นกล้า วิธีนี้ใช้การย้ายกล้าลงถุงชำเมื่อมีอายุได้ 15-20 วัน พอได้อายุ 30 วันจึงค่อยย้ายลงแปลงปลูก วิธีนี้จะให้ผักกาดเขียวปลีที่มีคุณภาพสูง (ไฉน ยอดเพชร, 2542)

2.4.2.3 การปฏิบัติรักษาผักกาดเขียวปลี

1) การให้น้ำ ผักกาดเขียวปลีมีความต้องการน้ำบ่อยครั้งและสม่ำเสมอในช่วงระยะเป็นต้นกล้า ซึ่งจะต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นในช่วงการเจริญเติบโต แต่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยลงในระยะห่อปลี

2) การพรวนดินและการกำจัดวัชพืช ควรทำพร้อมกับการถอนแยกและการเติมปุ๋ย คือ ควรทำเมื่อผักกาดเขียวปลีมีอายุประมาณ 7-10 วัน และ 15-20 วันหลังจากเมล็ดงอก

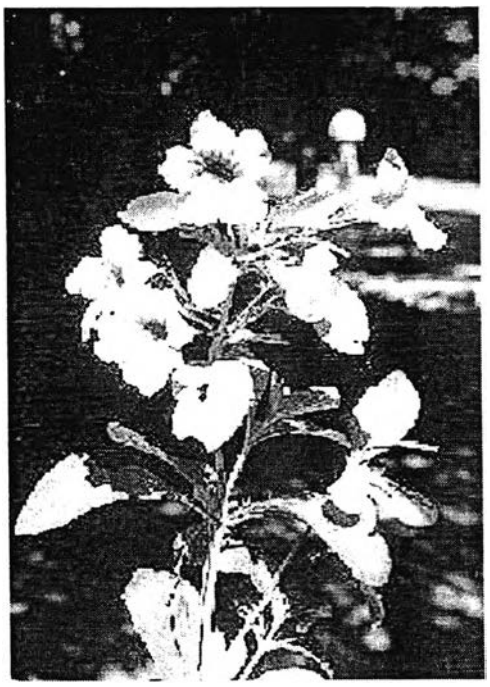
3) การใส่ปุ๋ย ปุ๋ยที่ใช้กับผักกาดเขียวปลีควรใช้ปุ๋ยที่มีอัตราส่วนของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียมเป็น 1.50-2 : 1 : 1.50-2 อย่างเช่น ใช้ปุ๋ยสูตร 14-14-21 ร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนจากปุ๋ยยูเรีย เป็นต้น การใช้ปุ๋ยนั้น ควรใส่ปุ๋ยสูตรเป็นปุ๋ยรองพื้นก่อนประมาณ 50-150 กิโลกรัมต่อไร่ พรวนกลบปุ๋ยลงไปในดิน สำหรับปุ๋ยไนโตรเจนนั้นจะใช้เป็นปุ๋ยเสริม ซึ่งจะใส่เมื่อผักกาดเขียวปลีมีอายุได้ 15 และ 30 วันหลังจากเมล็ดงอกโดยใช้ประมาณ 20-25 กิโลกรัมต่อไร่ พรวนดินกลบปุ๋ยจากนั้นรดน้ำให้ชุ่ม นอกจากปุ๋ยแล้วควรมีการให้ธาตุอาหารเสริมพวกโบแรกซ์ผสมน้ำฉีดพ่นในอัตราส่วน 40 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร ฉีดพ่นให้ทั่วทั้งต้นระหว่างการเจริญเติบโตพร้อมๆ กับการฉีดสารเคมีป้องกันโรคและแมลง (ไฉน ยอดเพชร, 2542)

2.4.2.4 การเก็บเกี่ยวผักกาดเขียวปลี

ผักกาดเขียวปลีที่ปลูกในประเทศไทยส่วนมากจะมีอายุของกล้าประมาณ 30 วันหลังจากหยอดเมล็ด จากนั้นจะเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะห่อปลีภายใน 40-45 วัน และจะสามารถเก็บเกี่ยวได้เมื่ออายุ 55-75 วันหลังจากการย้ายกล้าปลูก อย่างไรก็ตามอายุการเก็บเกี่ยวของผักกาดเขียวปลีก็ไม่เป็นไปตามนี้เสมอไปทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับฤดูการปลูกอีกด้วย อย่างเช่น ในแหล่งปลูกผักกาดเขียวปลีทางภาคกลาง ถ้าปลูกในฤดูฝนจะสามารถเก็บเกี่ยวได้เมื่ออายุ 55 วัน แต่ถ้าปลูกในฤดูหนาวจะมีอายุเก็บเกี่ยวนานขึ้นเป็น 60 วัน (ไฉน ยอดเพชร, 2542)

2.4.3 ด้อยติ่ง (Minnieroot)

ด้อยติ่ง หรืออังกาบ (Minnieroot) เป็นพืชในวงศ์ Acanthaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Ruellia tuberose* (วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี, 2548) เป็นพืชล้มลุกจำพวกหญ้าที่สามารถพบได้ตามทุ่งนา ป่าแล้ง และตามที่รกร้างว่างเปล่าทั่วไป (สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, 2547) ตามธรรมชาติจะขยายพันธุ์ด้วยวิธีการเพาะเมล็ด แต่หากเป็นการนำมาปลูกสามารถทำได้ทั้งการเพาะเมล็ดและการปักชำ



รูปที่ 2.6 ด้อยติ่ง

2.4.3.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของต้อยติ่ง

ต้อยติ่งเป็นพืชล้มลุกจำพวกหญ้า ลำต้นเป็นทรงสี่เหลี่ยมแข็งมีข้อห่างๆ สูงประมาณ 20-30 เซนติเมตร ตามลำต้นจะมีขนอ่อนๆ ขึ้นปกคลุมอยู่ ใบของต้อยติ่งเป็นใบเดี่ยว รูปหอกหรือรูปรีปลายใบมน โคนใบแหลม ขอบใบไม่มีจักเรียงกันเป็นคู่ๆ ไปตามข้อต้น ดอกมีลักษณะดอกเล็ก กลีบดอกรูปปากแตร 4-5 กลีบ สีม่วงออกตามรอยข้อ มีผลเหมือนผลข้าวเปลือกติดอยู่รอบข้อ ปลายตั้ง เมื่อแก่จัดจะแตกออกเป็นสองซีก เมล็ดกระจายไปได้ไกล ส่วนเมล็ดของต้อยติ่งนั้นมีสีส้มสด แช่น้ำจะพองออกเป็นเยื่อสีขาว (สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, 2547; วิทย์ เที่ยงบูรณธรรม, 2539)

2.4.3.2 ประโยชน์ของต้อยติ่ง

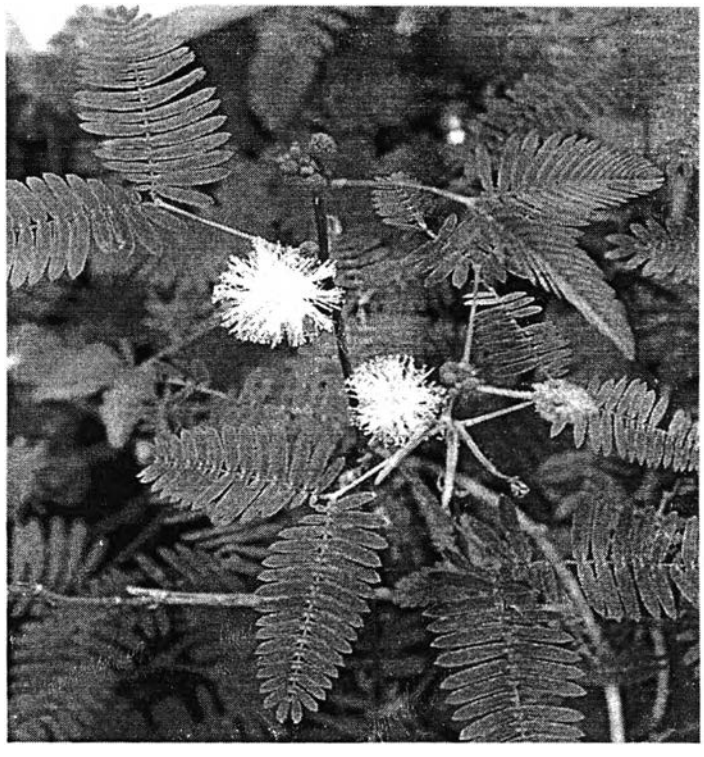
ต้อยติ่งเป็นวัชพืชที่ขึ้นตามที่รกร้างทั่วๆ ไปซึ่งดูเหมือนว่าจะไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ แต่จริงๆ แล้ว ต้อยติ่งเองก็สามารถนำส่วนต่างๆ มาใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการนำมาใช้เป็นสมุนไพร ซึ่งสามารถนำส่วนต่างๆ ของต้อยติ่งไปใช้ดังนี้

1) ราก ใช้บริโภคทำให้อาเจียน นำมาเป็นส่วนผสมของยาใช้สำหรับดับพิษ และแก้อาการปัสสาวะพิการ (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548; วิทย์ เที่ยงบูรณธรรม, 2539)

2) เมล็ด ใช้แช่น้ำปิดแผลเรื้อรัง ปิดฝี กัดฝ้าในแผลฝีได้ดี ถอนพิษเจ็บปวดจากแผลและฝี (สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, 2547)

2.4.4 ไมยราบ (Sensitive plant)

ไมยราบ หรือระงับ (Sensitive plant หรือ Shame bush) เป็นพืชในวงศ์ Fabaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Mimosa pudica Linn.* มีชื่อเรียกหลายชื่อตามท้องถิ่นที่พบ อย่างเช่น หนามหงับ กระทืบยอด กะหงับ ก้านของ ระงับ หงับพระพาย หญ้าจิยอบ หญ้าป้นยอด หนามหญ้าราบ เป็นต้น (สกูลเน็ตไทยแลนด์, 2538) เป็นไม้ล้มลุกกึ่งเลื้อย มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนของทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งในปัจจุบันสามารถพบได้ทั่วโลก (กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช, 2548) สำหรับในประเทศไทยพบการกระจายใน เชียงใหม่ เชียงราย ตาก ลำพูน เลย นครพนม ขอนแก่น ชลบุรี จันทบุรี สระบุรี และกาญจนบุรี (โครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี, 2548)



รูปที่ 2.7 ไมยราบ

2.4.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไมยราบ

ไมยราบเป็นไม้ล้มลุกฤดูเดียวหรือหลายฤดู ลำต้นเล็กเรียวเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-5 มิลลิเมตร เลื้อยทอดไปบนพื้นดิน หรือปีนป่ายขึ้นต้นพืชข้างเคียง ไม่มีรากที่ข้อ (decumbent) ลำต้นยาวถึง 1.5 เมตร มีสีเขียวแกมม่วง หรือสีม่วงแดง ผิวลำต้นมีหนาม prickle เป็นหนามปลายโค้งเล็กน้อย โคนหนามกว้างประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ปลายหนามสีดำ ลำต้นอ่อนมีขน

ใบของไมยราบเป็นใบประกอบแบบ bipinnate ก้านใบรวม rachis ยาวประมาณ 1.5-4 เซนติเมตร เรียงตัวแบบสลับ โคนก้านใบมีหูใบ 2 อันรูปรีหรือรูปไข่ ปลายฐานตัดขอบมีขนกว้าง ประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 3-5 มิลลิเมตร pinnae เกิดเป็นคู่แบบตรงข้ามกัน จำนวน 1-2 คู่ ก้านใบรวม rachilla ยาวประมาณ 1.5-5 เซนติเมตร มีขนปกคลุม ใบย่อยเรียงตัวแบบตรงข้าม จำนวน 8-16 คู่ ใบย่อยว่องไวต่อการสัมผัส ก้านใบย่อยยาวประมาณ 0.2-0.5 มิลลิเมตร ใบย่อยรูปขอบขนาน โคนใบ oblique ปลายใบเป็นติ่งแหลมหรือมน ขอบใบ และผิวท้องใบมีขนปกคลุม ผิวหลังใบเรียบ ใบกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 3-13 มิลลิเมตร

ดอกของไมยราบเป็นดอกช่อ globose head หรือ oblong head เกิดขึ้นที่ซอกใบ ก้านช่อดอกยาวประมาณ 3-5 เซนติเมตร ก้านดอกมีขนปกคลุม เส้นผ่าศูนย์กลางของดอกเมื่อบานทั้งช่อยาวประมาณ 13-18 มิลลิเมตร ดอกย่อยมีกลีบเลี้ยงสีเขียว 5 กลีบติดกันเป็นรูปถ้วย ยาวประมาณ 0.1-0.2 มิลลิเมตร กลีบดอกเป็นสีชมพูหรือชมพูแกมม่วง 5 กลีบซึ่งติดกันเป็นหลอดสั้นๆ ตรงปลายแยกออกเป็น 5 แฉก กลีบดอกยาวประมาณ 4-6 มิลลิเมตร เกสรเพศผู้มี 4 อันแยกกัน ก้านชูอับเรณูสีชมพูคดงอไปมายาวประมาณ 3-5 มิลลิเมตร อับเรณูสีเหลือง มีเกสรเพศเมีย 1 อัน รังไข่ superior ovary สีเขียวลักษณะแบน ก้านเกสรเพศเมียมีสีชมพูขาว ยาวประมาณ 4-5 มิลลิเมตร ยอดเกสรเพศเมียเป็นตุ่มเล็กๆ (marginal placentation)

ผลและเมล็ดของไมยราบ ผลแห้งจะมี loment แบนและมีรอยคอดตามจำนวนเมล็ด ผลกว้างประมาณ 3-4 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 10-15 มิลลิเมตร มีขนปกคลุมโดยเฉพาะที่สันขอบผล เมล็ดแบนเป็นสันนูนตรงกลาง จำนวนประมาณ 2-5 เมล็ดต่อผล ผลหักตามรอยคอด (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548)

2.4.4.2 ประโยชน์ของไมยราบ

ไมยราบเป็นพืชที่มีสรรพคุณทางด้านการใช้เป็นสมุนไพร ซึ่งสามารถนำส่วนต่างๆ ของไมยราบไปใช้ในการทำยาดังนี้

1) ใบ ใช้แก้โรคเริม งูสวัด โรคพุพอง และไฟลามป่า

2) ราก ใช้แก้ไอ ขับเสมหะ แก้หลอดลมอักเสบเรื้อรัง แก้ระบบการย่อยอาหารของเด็กไม่ดี บำรุงกระเพาะอาหาร ทำให้ตาสว่าง ระงับประสาท แก้บิด ขับปัสสาวะ แก้ริดสีดวงทวาร รักษาโรคปวดเวลามีประจำเดือน ถ้าใช้ขนาดสูงมากๆ จะเกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน

3) ลำต้น ใช้ขับปัสสาวะ แก้ไตพิการ แก้ทางเดินปัสสาวะอักเสบ ขับระดูขาว ขับโลหิต

4) ทั้งต้น ใช้ขับปัสสาวะแก้ไตพิการ แก้ทางเดินปัสสาวะอักเสบ ขับระดูขาว แก้ไข้ออกหัด แก้นอนไม่หลับ แก้กระเพาะอาหารอักเสบ สงบประสาท แก้ลำไส้อักเสบ แก้เด็กเป็นตานขโมย แก้ผื่นคัน แก้ตาบวมเจ็บ แก้แผลฝี (สกูลเน็ตไทยแลนด์, 2538)

2.5 การเติมสารเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของพืชในการบำบัดโลหะหนัก

2.5.1 ความหมายของตัวคีเลต

ตัวคีเลต มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกซึ่งมีความหมายว่า "กรงเล็บ" (claw) เมื่อพิจารณาจากรากศัพท์แล้ว ความหมายของตัวคีเลตน่าจะเป็นสารที่มีแนวโน้มที่จะยึดแคตไอออนบางชนิด โดยที่จะรวมตัวกันอย่างเหนียวแน่น และไม่ยอมให้แคตไอออนนั้นไปทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ดังนั้นจึงสรุปความหมายได้ว่า ตัวคีเลต (chelating agent) ก็คือ สารอินทรีย์เคมีซึ่งสามารถจะรวมตัวและคุ้มกันไม่ให้มีการตกตะกอนของแคตไอออนบางชนิด รวมทั้งจุลธาตุอาหารที่เป็นบวกทั้งสี่ อันได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสีด้วย ซึ่งจะเรียกปฏิกิริยาการรวมนี้ว่า chelation และผลที่ได้จากปฏิกิริยานี้จะเรียกว่า chelate โดยที่ตัวคีเลตจะห้อมล้อมแคตไอออนของธาตุที่เป็นโลหะ (metallic cation) เข้าไปจนไม่เปิดโอกาสให้อนุมูลอื่นๆ ยื่นมือเข้าไปเกาะกับโลหะธาตุที่เป็นประจุบวกนั้นได้ และทำให้โลหะธาตุของที่เป็นองค์ประกอบของสารละลายที่เป็นองค์ประกอบของคีเลตอยู่ในสารละลายที่มี pH สูงกว่าเมื่อโลหะธาตุเหล่านั้นเป็นแคตไอออนในสภาพสารละลายธรรมดา นั่นก็คือ โลหะธาตุที่มีโครงสร้างอยู่ในคีเลตจะได้รับการคุ้มครองจึงเกิดการตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะได้ยากขึ้น อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงไปใช้ได้ง่ายขึ้น จึงเป็นประโยชน์ต่อพืชได้มากขึ้นนั่นเอง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2.5.2 การคัดเลือกตัวคีเลตที่ใช้ในงานวิจัย

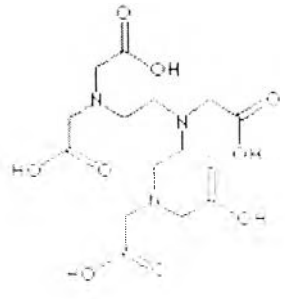
ในการทำ phytoremediation เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีนั้น นอกจากการเลือกพืชที่เหมาะสมต่อชนิดของโลหะหนักนั้นๆ แล้ว การปรับสภาพของดิน และการปรับรูปของโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงไปใช้ได้ก็นับว่าเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งของการทำ phytoremediation ซึ่งในปัจจุบันได้มีการเติมสารบางชนิดลงไปในดินเพื่อปรับสภาพดินให้เหมาะสมแก่การทำ phytoremediation โดยสารเหล่านี้จะเพิ่มประสิทธิภาพในการสะสมโลหะหนักบางชนิดได้มากขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกสาร 3 ชนิดเพื่อใช้เติมลงไปในดินที่มีการปนเปื้อนของทองแดงซึ่งได้แก่ DTPA (diethylenetriaminepentaacetic acid) ammonium sulfate และ citric acid ซึ่งสารทั้ง 3 ชนิดที่ถูกเลือกมาใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันโดยที่ DTPA เป็นตัวคีเลตที่มีความนิยมในการใช้ในงานวิจัยต่างๆ เนื่องจาก DTPA เป็นสารที่สามารถจับกับโลหะหนัก ทำให้มีโลหะหนักอยู่ในสารละลายดินมากขึ้น (Garrido et al., 2005) ส่งผลให้พืชสามารถดูดดึงโลหะหนักเข้าสู่พืชได้ดีขึ้น อย่างเช่น ในการทดลองใช้ DTPA ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึงตะกั่วในถั่วลันเตา พบว่า ถั่วลันเตาที่มีการเติม DTPA นั้นมีการดูดดึงตะกั่วได้ดีกว่าถั่วลันเตาที่ไม่มี

การเติม DTPA อย่างมีนัยสำคัญ (Blaylock and Huang, 2000) สำหรับ ammonium sulfate และ citric acid นั้นต่างมีสมบัติทางเคมีเป็นกรด ซึ่งในสภาวะที่เป็นกรดพืชจะสามารถดูดดึงโลหะหนักสู่พืชได้ดีขึ้น (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) โดยที่ ammonium sulfate นั้นเป็นปุ๋ยที่ช่วยในการเจริญเติบโตของพืชและได้มีการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึงซีเซียมในพืชพบว่ามีการดูดดึงซีเซียมในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของพืชอย่างมีนัยสำคัญ (Blaylock and Huang, 2000) ส่วน citric acid ได้มีการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึงยูเรเนียมในพืชพบว่าได้ผลดีกว่า organic acid ชนิดอื่นที่ใช้ในการทดลอง (Blaylock and Huang, 2000) จากข้อมูลที่กล่าวมาในข้างต้นจึงคาดว่าสารทั้ง 3 ชนิดนี้น่าจะมีประสิทธิภาพในการช่วยในการบำบัดดินที่เกิดการปนเปื้อนของทองแดงได้เป็นอย่างดี

2.5.3 คุณสมบัติของตัวคีเลตที่ใช้ในงานวิจัย

1) DTPA (diethylenetriaminepentaacetic acid)

DTPA (diethylenetriaminepentaacetic acid) มีสูตรทั่วไปคือ $C_{14}H_{23}N_3O_{10}$ มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) 393.35 มีชื่อเรียกหลายชื่อ ได้แก่ diethylenetriaminepentaacetic acid; diethylenetriamine-N,N,N',N',N''-pentaacetic acid; pentetic acid; N,N-Bis(2-(bis-(carboxymethyl)amino)ethyl)-glycine; diethylenetriamine pentaacetic acid และ [[(Carboxymethyl)imino]bis(ethylenenitrilo)]-tetra-acetic acid

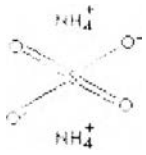


รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของ diethylenetriaminepentaacetic acid

DTPA เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วมีฤทธิ์เป็นกรด ในสภาวะสารละลายอิ่มตัวมี pH 2.1-2.5 ที่อุณหภูมิห้องเป็นของแข็งมีลักษณะเป็นผงสีขาว สามารถละลายน้ำได้ 0.5 wt% ที่อุณหภูมิ 25°C (Chemicalland21.com, 2006)

2) ammonium sulfate

ammonium sulfate มีสูตรทั่วไปคือ $(NH_4)_2SO_4$ มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) 132.14 มีชื่อเรียกหลายชื่อ ได้แก่ sulfuric acid diammonium salt; actamaster; ammonium sulfate (2:1); diammonium sulfate; dolamin; mascagnite; sulfatom ammoniya; sulfatom ammoniya (Russian)

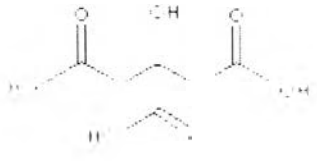


รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของ ammonium sulfate

ammonium sulfate ที่อุณหภูมิห้องมีสถานะเป็นของแข็งมีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น มีรสชาติเค็ม มีจุดหลอมเหลวที่ 235 °C สามารถละลายน้ำได้ง่าย แต่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์และอะซิโตน และเมื่อละลายน้ำแล้วแสดงคุณสมบัติเป็นกรด (Chemicalland21.com, 2006)

3) citric acid

citric acid มีสูตรทั่วไปคือ $C_6H_8O_7$ มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) 192.14 มีชื่อเรียกหลายชื่อ ได้แก่ citric Acid; beta-hydroxytricarballylic acid; aciletten; citretten; citro; 2-hydroxy-1,2,3-propanetricarboxylic acid; 2-hydroxytricarballylic acid: kyselina citronova: kyselina 2-hydroxy-1,2,3-propantrikarbonova; 2-hydroxytricarballylic acid: citronensäure



รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของ citric acid

citric acid ที่อุณหภูมิห้องมีสถานะเป็นของแข็งมีลักษณะเป็นผลึกใสไม่มีสีที่มีความหนาแน่น 1.665 ×103 kg/m^3 มีจุดหลอมเหลว 235 (Wikipedia, 2006) สามารถละลายน้ำได้ 59.2% ที่สารละลายเข้มข้น 0.1 N มี pH 2.2 และมีการเผาตัวเองที่อุณหภูมิ 1,011 °C (Chemicalland21.com, 2006)